

УДК 621.311

Моделирование кабельных трансформаторов тока для защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ

В.А. Шуин, Г.А. Филатова, В.Д. Лебедев
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ по цепям тока подключаются к кабельным трансформаторам тока нулевой последовательности различных типов, работающим в зависимости от исполнений устройств защиты с большими или очень малыми вторичными нагрузками. Для выполнения устройств защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтралей используются токи промышленной частоты, высшие гармоники, токи переходных процессов, «наложенные» токи не промышленной частоты. Погрешности кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности в статических и динамических режимах работы и их влияние на устойчивость функционирования указанных устройств защиты исследованы недостаточно. Наиболее эффективным методом исследования статических и динамических режимов защит от однофазных замыканий на землю является математическое моделирование на ЭВМ. Поэтому разработка математических моделей трансформаторов тока нулевой последовательности различных типов является актуальной задачей.

Материалы и методы: Моделирование кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности осуществлено в среде Matlab с пакетом расширения Simulink с использованием экспериментально полученных характеристик намагничивания с применением программно-экспериментального комплекса NI LabView. Проверка достоверности и оценка погрешностей разработанных моделей в статических и динамических режимах их работы осуществлена путем сравнения параметров и характеристик моделей с аналогичными параметрами и характеристиками реальных трансформаторов тока нулевой последовательности, полученными экспериментальными методами с использованием программно-экспериментального комплекса NI LabView, программно-аппаратного комплекса для проверки и исследования устройств релейной защиты типа PETOM-51, осциллографа Tektronix и другой контрольно-измерительной аппаратуры.

Результаты: Разработаны модели кабельных трансформаторов тока нулевой последовательности, выполненные с использованием основной кривой намагничивания, средних кривых намагничивания и уравнения динамики перемагничивания магнитопроводов. Приведены результаты их исследований и оценки погрешностей в статических и динамических режимах их работы.

Выводы: Результаты исследований показали, что более высокую точность преобразования в статических и динамических режимах работы обеспечивает модель трансформатора тока нулевой последовательности, выполненная на основе уравнения динамики перемагничивания магнитопроводов. Разработанные модели трансформаторов тока нулевой последовательности различных типов используются в исследованиях и разработках устройств защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6–10 кВ.

Ключевые слова: распределительные электрические сети 6–10 кВ, устройства защиты от однофазных замыканий на землю, кабельные трансформаторы тока нулевой последовательности, моделирование на ЭВМ.

Simulation of cable current transformers for protection from single-phase ground faults in 6–10 kV networks

V.A. Shuin, G.A. Filatova, V.D. Lebedev
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Abstract

Background: Single-phase ground fault (SPGF) protection units in 6–10 kV networks are connected by current circuits to the cable zero-sequence current transformers (ZSCT) of various types, operating at large or very small secondary loads depending on the configuration of the protection devices. It is customary to use industrial frequency currents, higher harmonics, transient currents, «imposed» non-industrial frequency currents to realize SPGF protection devices in 6–10 kV networks with different modes of neutral grounding. The errors of cable ZSCT in static and dynamic modes and their impact on the sustainability of the mentioned protection devices have not been studied well enough. The most effective method of studying static and dynamic modes of protection against SPGF is computer-aided mathematical modeling. Therefore, it is urgent to develop mathematical models of various types ZSCT.

Materials and Methods: The simulation of cable ZSCT is conducted in the computer environment Matlab and the expansion pack Simulink based on the ZSCT magnetization characteristics obtained experimentally in the software package NI LabView. Validation and error estimation of the developed ZSCT models in static and dynamic modes of operation is carried out by comparing the parameters and characteristics of the models with the same parameters and characteristics of real ZSCT obtained by experimental methods using the experimental software complex NI LabView, the hardware and software complex for testing and research of relay protection equipment RETOM-51, Tektronix oscilloscope and other measuring equipment.

Results: The paper considers models of cable ZSCT based on normal magnetization curve, average magnetization curves and magnetic core magnetization dynamics equations. It also presents the results of the research and error evaluation of the models in static and dynamic modes of operation.

Conclusions: The research has showed that higher conversion accuracy in static and dynamic modes of operation is provided by the ZSCT model based on magnetic core magnetization dynamics equations. The developed models of ZSCT of different types are used in the research and development of SPGF protective devices in medium voltage networks.

Key words: 6–10 kV distribution power networks, single-phase ground fault protection devices, cable zero-sequence current transformer, computer modeling.

Введение. Большая часть электрической энергии распределяется потребителям через электрические сети среднего напряжения 6–10 кВ, работающие с режимами заземления нейтрали, ограничивающими токи однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в целях повышения надежности электроснабжения потребителей (с изолированной нейтралью, с резонансным заземлением нейтрали через дугогасящий реактор, с высокоомным заземлением нейтрали через резистор). ОЗЗ являются преобладающим видом повреждений в рассматриваемых сетях (70 % и более от всех электрических повреждений [1]) и часто являются первопричиной аварий, сопровождающихся значительным экономическим ущербом. Величина ущерба от ОЗЗ зависит от скорости определения места повреждения устройствами защиты от ОЗЗ и его ликвидации.

Устройства защиты от ОЗЗ в сетях 6–10 кВ по цепям тока подключаются, как правило, к кабельным трансформаторам тока нулевой последовательности (ТТНП) различных типов (ТЗЛМ, ТЗРЛ и др.), часто работающим с большими вторичными нагрузками. Для действия устройств защиты от ОЗЗ, в зависимости от режима заземления нейтрали сети, могут использоваться токи промышленной частоты, высших гармоник, переходного процесса, возникающего в момент пробоя изоляции, «наложенных» токов не промышленной частоты [2]. Таким образом, в отличие от устройств релейной защиты от коротких замыканий (КЗ), основанных на использовании для действия токов промышленной частоты, различные исполнения устройств защиты от ОЗЗ должны обеспечивать эффективность функционирования при разнообразных и более сложных по форме входных токах.

Наиболее эффективным методом исследования как динамических, так и статических режимов работы устройств защиты от ОЗЗ различных способов выполнения и исполнений, подключаемых к кабельным ТТНП, является математическое моделирование на ЭВМ. Поэтому разработка математических моделей ТТНП различных типов для исследования статических и динамических режимов функционирования устройств защиты от ОЗЗ является, наш взгляд, актуальной задачей.

Выбор метода моделирования и исследования статических и динамических

режимов функционирования ТТНП. При решении задач, связанных с совершенствованием существующих или разработкой новых устройств защиты от ОЗЗ, возникает необходимость в моделировании не только ТТНП, но и самих устройств защиты от ОЗЗ, а также комплексных систем «электроэнергетический объект – устройство защиты от ОЗЗ». Для моделирования электроэнергетических объектов (ЭЭО) и комплексных систем «ЭЭО – устройство релейной защиты» наиболее широкое применение получил пакет программ моделирования Simulink, реализованный в среде универсальной системы моделирования Matlab, в состав которого входит специальный пакет программ (библиотека) SimPowerSystem, ориентированный на схемотехническое имитационное моделирование электротехнических систем и устройств. Следует, однако, отметить, что стандартные имитационные блоки SimPowerSystem не всегда позволяют с достаточной точностью моделировать сложные электрические и электромагнитные процессы в нелинейных системах и устройствах. Такие трудности могут возникать при необходимости создания достаточно точных моделей нелинейных устройств, к которым относится ТТНП. В этих случаях модели необходимой точности, в принципе, могут быть получены на основе блоков основной библиотеки Simulink, реализующих метод структурного моделирования. Сочетание метода схемотехнического имитационного моделирования ЭЭО и метода структурного моделирования, реализованного в других пакетах различного назначения Simulink, представляется достаточно эффективным методом решения задач, связанных с исследованием динамических и статических режимов работы ТТНП в устройствах защиты от ОЗЗ в сетях 6–10 кВ.

О подходах к построению математической модели ТТНП. Создание общей модели трансформаторов тока (ТТ), т.е. модели, способной предугадывать поведение трансформатора в широком диапазоне значений первичного тока, частот и возможных величин вторичной нагрузки, является сложной задачей [3]. Поэтому для различных значений первичного тока, разных частотных диапазонов и при различных величинах вторичной нагрузки, как правило, использовались различные модели ТТ.

В большинстве современных коммерческих систем моделирования (SPICE-симуляторов), как правило, используется модель Джилса-Аттертона [4, 5], которая описывает нелинейность стали сердечника на основе физических свойств магнитного материала с использованием физической теории магнитных доменов в ферромагнитных материалах. Также часто (например, в симуляторе LTspice [6]) используется упрощенная гистерезисная модель магнитного сердечника, которую предложили Джон Чан и др. [7]. В отличие от модели Джилса-Аттертона, гистерезисная модель LTspice использует только основные и вполне понятные параметры петли магнитного гистерезиса. Однако эти модели достаточно сложны для реализации в среде системы моделирования Matlab.

В задачах, связанных с моделированием устройств релейной защиты, чаще применяют более простые модели ТТ, в которых магнитный сердечник описывается основной или средней кривой намагничивания (ОКН или СКН) с учетом потерь на гистерезис и вихревые токи [8–10]. Такие модели, как правило, обеспечивают приемлемую точность расчетов вторичных величин при больших значениях первичного тока и малых нагрузках ТТ. Как уже отмечалось выше, в отличие от ТТ для релейной защиты от КЗ, ТТНП в защитах от ОЗЗ должны обеспечивать требуемую точность преобразования в большем динамическом диапазоне значений первичного тока (от единиц и долей ампера в установившемся режиме ОЗЗ до сотен и тысяч ампер в переходных режимах) и при более сложных по форме входных токах. Поэтому возможность и условия применения для построения моделей ТТНП описаний магнитного сердечника в форме ОКН и СКН требует дополнительных исследований.

В [11] показано, что существенное повышение точности расчетов электротехнических устройств с магнитопроводами может быть получено при использовании для описания процессов в магнитном сердечнике не ОКН или СКН, а уравнения динамики перемагничивания, представленного в следующей форме:

$$\frac{dB}{dt} = r \left(1 - \frac{B^2}{B_s^2} \right) [H(t) - H_{ст}(B)], \quad (1)$$

где $H_{ст}(B)$ – статическая петля гистерезиса; r – потери на вихревые токи и магнитную вязкость.

Учитывая изложенное, рассматривались три подхода к построению модели ТТНП, основанные соответственно на использовании для описания магнитного сердечника ОКН, СКН и уравнения динамического перемагничивания.

Методика снятия экспериментальных характеристик намагничивания ТТНП. При изготовлении даже однотипных ТТНП, выпущенных в разные годы, могут быть использо-

ваны разные марки электротехнических сталей, имеющие различные характеристики намагничивания. Но даже при использовании для изготовления сердечника ТТНП одной и той же марки стали характеристики намагничивания магнитного сердечника могут существенно отличаться от справочных характеристик намагничивания исходной стали. Поэтому для проверки адекватности и оценки точности (погрешностей) моделей ТТНП при их создании в системе Simulink необходимо использовать характеристики (ОКН, СКН, петли магнитного гистерезиса), полученные экспериментально для исследуемого образца трансформатора тока. Проверка адекватности и оценка точности моделей, основанных на использовании указанных выше способов описания магнитных свойств сердечника трансформатора тока, осуществлялась для ТТНП типа ТЗЛМ. Для получения экспериментальных характеристик сердечников ТТНП типа ТЗЛМ использовалось измерительное оборудование фирмы National Instruments, обеспечивающее возможность получения результатов непосредственных измерений временных зависимостей токов и напряжений ТТНП и результатов их математической обработки, а именно:

- временных зависимостей напряженности и индукции магнитного поля в сердечнике трансформатора;
- временных зависимостей потребляемой мощности и энергии;
- петли гистерезиса с определением мощности активных потерь на гистерезис и вихревые токи, а также потерь в проводниках обмоток;
- зависимости тока намагничивания от напряжения на ветви намагничивающей схемы замещения и определение по данной зависимости реактивной мощности.

Математическая модель ТТНП на основе ОКН. Для получения модели трансформатора тока с нелинейным магнитопроводом использован типовый элемент Saturable Transformer пакета расширения Simulink системы моделирования Matlab. Модель нелинейного ТТНП с активно-индуктивной нагрузкой в среде системы моделирования Matlab+Simulink с измерительными средствами приведена на рис. 1.

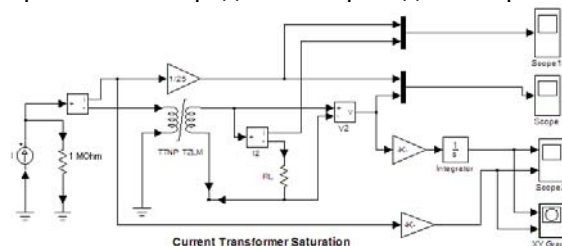


Рис. 1. Модель ТТНП на основе ОКН (СКН) в среде системы Matlab+Simulink

Нелинейность кривой намагничивания магнитного сердечника в форме ОКН и активные

потери на гистерезис и вихревые токи учитываются непосредственно в параметрах блока Saturable Transformer.

Для оценки точности модели ТТНП с ОКН в системе Matlab были сняты осциллограммы вторичных напряжений и зависимости $U_{2\text{ТТНП}} = f(I_{1\text{ТТНП}})$ для среднеквадратичных значений при синусоидальном первичном токе I_1 в диапазоне от 1 до 20 А и диапазоне частот 50–500 Гц в режиме холостого хода и при сопротивлении вторичной нагрузки $Z_b = 0,1$ Ом.

Полученные на модели зависимости $U_{2\text{модель}} = f(I_{1\text{ТТНП}})$ сравнивались с аналогичными и зависимостями $U_{2\text{ТТНП}} = f(I_{1\text{ТТНП}})$, полученными экспериментально для реальных образцов ТТНП типа ТЗЛМ с использованием программно-аппаратного комплекса типа РЕТОМ-51 и цифрового осциллографа типа Tektronix. В табл. 1, 2 приведены зависимости $U_{2\text{ТТНП}} = f(I_{1\text{ТТНП}})$ и $U_{2\text{модель}} = f(I_{1\text{ТТНП}})$ для режима холостого хода ТТНП. Такой или близкий к нему режим работы ТТНП возможен для некоторых исполнений устройств защиты от ОЗЗ на электрохимической или микроэлектронной базе.

Таблица 1. Оценка точности модели ТТНП на основе ОКН в режиме холостого хода при частоте $f = 50$ Гц

I_1 , А	$U_{2\text{ТТНП}}$, В	$U_{2\text{модель}}$, В	f_u , %
3,00	1,09	1,87	-71,56
4,00	1,87	2,51	-34,22
5,00	2,70	3,15	-16,67
6,00	3,50	3,73	-6,57
7,00	4,20	4,15	1,19
8,00	4,75	4,53	4,63
9,00	5,20	4,92	5,38
10,00	5,44	5,31	2,39
12,00	5,78	5,96	-3,11
15,00	6,03	6,68	-10,78
18,00	6,17	7,30	-18,31
20,00	6,23	7,65	-22,79

Таблица 2. Оценка точности модели ТТНП на основе ОКН в режиме холостого хода при частоте $f = 500$ Гц

I_1 , А	$U_{2\text{ТТНП}}$, В	$U_{2\text{модель}}$, В	f_u , %
3,00	3,08	3,80	-23,38
4,00	4,30	5,06	-17,67
5,00	5,66	6,32	-11,59
6,00	7,12	7,57	-6,32
7,00	8,68	8,82	-1,61
8,00	10,33	10,07	2,49
9,00	12,07	11,33	6,15
10,00	13,90	12,59	9,46
12,00	17,76	15,10	14,98
15,00	23,70	18,89	20,32
18,00	29,37	22,67	22,83
20,00	32,45	25,19	22,39

Анализ данных табл. 1, 2 и полученных осциллограмм (рис. 2) показывает, что модель ТТНП на основе ОКН при работе ТТНП в режиме холостого хода обеспечивает приемлемые погрешности (до 10 %) по интегральным (среднеквадратичным) значениям вторичного напряжения только при работе на линейном участке ОКН ($I_{1\text{ТТНП}} \approx 5\text{--}10$ А). При этом погрешности по мгновенным значениям могут значи-

тельно превышать 10 % (например, рис. 3), что обуславливает возможность значительных искажений спектра высших гармоник вторичного напряжения.

Поэтому модель ТТНП на основе ОКН не приемлема для исследования на моделях режимов функционирования устройств защиты от ОЗЗ, имеющих большое входное сопротивление по цепям тока (например, токовых защит нулевой последовательности с реле тока РТ-40/0,2, токовых защит на основе высших гармоник типа УСЗ-2/2, направленных защит типа ЗЗП-1 и др.).

При работе ТТНП с малой вторичной нагрузкой, что характерно для микроэлектронных и микропроцессорных исполнений устройств защиты от ОЗЗ, погрешности модели ТТНП на основе ОКН значительно уменьшаются.

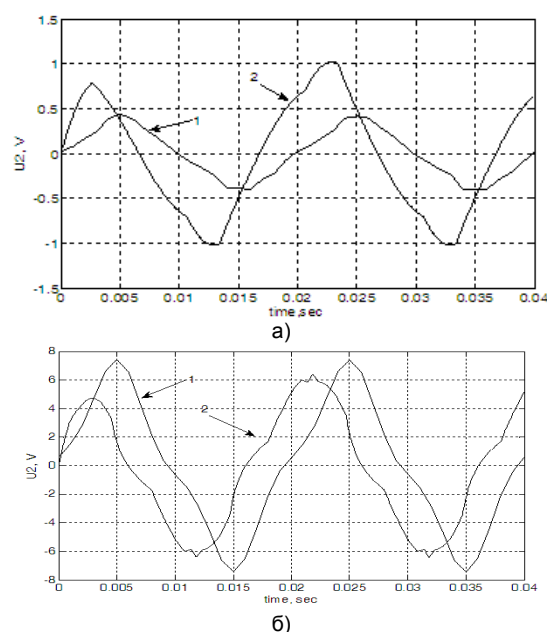


Рис. 2. Осциллограммы $U_{2\text{ТТНП}}(t)$ для режима холостого хода ТТНП типа ТЗЛМ, полученные экспериментально (кривая 1) и на модели (кривая 2) для первичных токов: а – $I_1 = 1$ А; б – $I_1 = 10$ А

Так, при вторичной нагрузке $Z_b = 0,1\text{--}1$ Ом погрешности модели на основе ОКН в диапазоне первичных токов I_1 с частотой 50 Гц от $\sim 2\text{--}3$ А до 100 А и более не превышают $\sim 10\%$, а угловые погрешности – единиц градусов. При увеличении частоты первичного тока до 500 Гц (предельная частота устройства РЕТОМ-51 как источника тока) токовые и угловые погрешности моделей уменьшаются. Поэтому при малых вторичных нагрузках модель на основе ОКН в принципе может использоваться для исследования стационарных режимов работы ТТНП во всем реальном диапазоне первичных токов устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании различных составляющих установившегося тока ОЗЗ (составляющих промышленной частоты, высших гармоник).

Математическая модель ТТНП на основе СКН. В [10] показано, что при необходи-

мости максимально точного отображения не только интегральных, но и мгновенных значений вторичного тока при моделировании трансформаторов тока необходимо использовать СКН. Для получения средних кривых намагничивания и построения модели на основе СКН использовались петли гистерезиса магнитопровода ТТНП типа ТЗЛМ, полученные экспериментально с помощью программного инструментального комплекса LabView фирмы National Instruments и источника первичного синусоидального тока на частоте 50 Гц для значений первичного тока от 1 до 30 А (рис. 3).

Структурная схема математической модели ТТНП на основе СКН в системе моделирования Matlab+Simulink аналогична модели на основе ОКН (рис. 1).

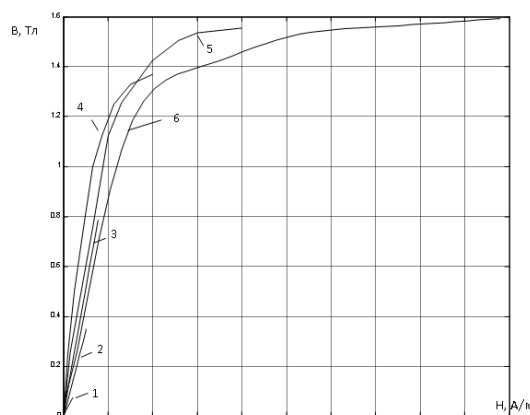


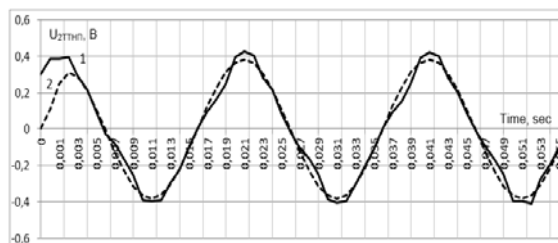
Рис. 3. СКН магнитопровода ТТНП типа ТЗЛМ на частоте 50 Гц для различных значений первичного тока $I_{1\text{ТТНП}}$: 1 – $I_{1\text{ТТНП}} = 1$ А; 2 – $I_{1\text{ТТНП}} = 3$ А; 3 – $I_{1\text{ТТНП}} = 5$ А; 4 – $I_{1\text{ТТНП}} = 10$ А; 5 – $I_{1\text{ТТНП}} = 30$ А; 6 – ОКН

Точность полученных моделей на основе СКН в различных режимах работы ТТНП оценивалась таким же образом, как и моделей на основе ОКН. Сравнение экспериментальных и расчетных осциллограмм вторичных напряжений $U_{2\text{ТТНП}} = f(I_{1\text{ТТНП}})$, полученных соответственно на реальных образцах ТТНП и на их моделях для различных значений первичного тока, показало, что использование СКН позволяет существенно повысить точность модели ТТНП в режиме холостого хода трансформатора тока в области малых значений первичного тока ТТНП $I_1 < 10$ А (например, рис. 4). Однако при токах $I_1 > 10$ А, соответствующих началу насыщения магнитопровода ТТНП данного типа, точность модели на основе СКН для режима холостого хода (большой вторичной нагрузки) существенно уменьшается.

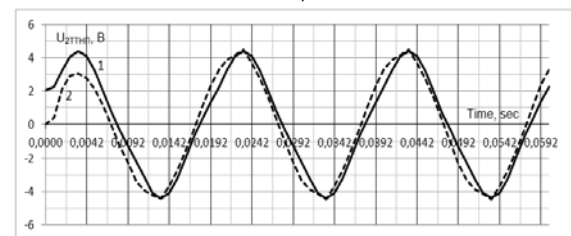
Поэтому модели на основе СКН приемлемы для исследования режимов функционирования устройств защиты от ОЗЗ, имеющих большие значения входного сопротивления по цепям тока, только при первичных токах, не создающих насыщения магнитопровода ТТНП ($I_1 < 10$ А).

При малых значениях сопротивления вторичной нагрузки ТТНП, не превышающих ~1 Ом, модель на основе СКН, как и модель на

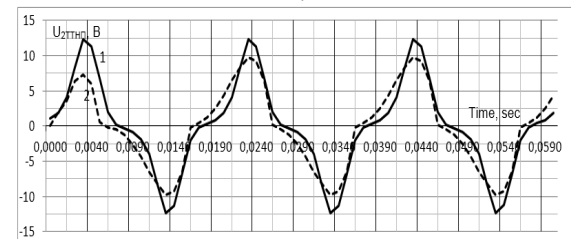
основе ОКН, обеспечивает существенное снижение токовой и угловой погрешностей. При таких вторичных нагрузках модели ТТНП на основе СКН позволяют обеспечить более высокую точность преобразования мгновенных значений первичного тока на частоте 50 Гц в диапазоне значений I_1 до ~100 А, чем модель на основе ОКН. При увеличении частоты первичного тока до 500 Гц погрешности модели ТТНП на основе СКН уменьшаются.



а)



б)



в)

Рис. 4. Сравнение экспериментальных осциллограмм $U_{2\text{ТТНП}}(t)$ (кривая 1) и осциллограмм, полученных для моделей ТТНП типа ТЗЛМ на основе СКН (кривая 2), в режиме холостого хода трансформатора тока: а – $I_{1\text{ТТНП}} = 1$ А; б – $I_{1\text{ТТНП}} = 5$ А; в – $I_{1\text{ТТНП}} = 10$ А

Поэтому в режиме малых вторичных нагрузок модель на основе СКН, как и модель на основе ОКН, может использоваться для исследования стационарных режимов работы ТТНП практически во всем реальном диапазоне первичных токов устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании различных составляющих установившегося тока ОЗЗ, однако модель на основе СКН обеспечивает при этом несколько большую точность.

Основной недостаток данного подхода – необходимость использования семейства СКН, соответствующих различным значениям тока намагничивания. Для создания более универсальной модели на основе СКН, отражающей работу ТТНП на всем диапазоне первичных токов, можно использовать усредненную аппроксимацию СКН, полученных для разных значе-

ний тока намагничивания. Аппроксимирующая кривая строится таким образом, чтобы она проходила как можно ближе к средним кривым, соответствующим разным первичным токам, и отражала как можно точнее нелинейность характеристики намагничивания сердечника ТТНП. Принцип построения такой обобщенной СКН показан на рис. 5.

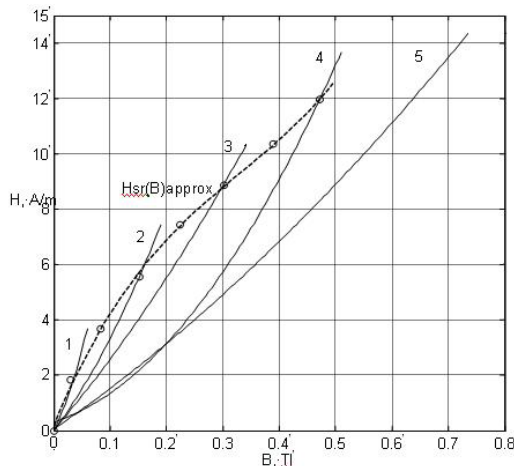


Рис. 5. Построение обобщенной СКН по аппроксимированным средним кривым намагничивания, полученным для значений первичного тока ТТНП типа ТЗЛМ от 1 до 5 А: 1 — $I_{1\text{ТТНП}} = 1$ А; 2 — $I_{1\text{ТТНП}} = 2$ А; 3 — $I_{1\text{ТТНП}} = 3$ А; 4 — $I_{1\text{ТТНП}} = 4$ А; 5 — $I_{1\text{ТТНП}} = 5$ А

Обобщенная СКН проводится через середины отрезков, проведенных через вершины кривых параллельно оси индукции и соединяющих, таким образом, две соседние средние кривые (рис. 5).

Использование обобщенной СКН позволяет заменить семейство моделей на основе СКН, полученных для различных значений тока намагничивания, одной общей моделью, но увеличивает погрешности моделирования. Анализ результатов расчета показал, что такой подход дает меньшую погрешность преобразования мгновенных значений первичного тока, чем подход на основе ОКН, но большую погрешность, чем семейство моделей на основе СКН, соответствующих расчетному значению первичного тока.

Математическая модель на основе уравнения динамического перемангничивания. В основе данной модели лежит уравнение динамики перемангничивания (1), предложенное в [11]. Преимуществом модели ТТНП, основанной на использовании уравнения (1), в отличие от моделей, нелинейность которых описывается ОКН или СКН в форме однозначной функции $B = f(H)$, а активные потери на гистерезис и вихревые токи приближенно учитываются постоянным активным сопротивлением, является более точный учет зависимости активных потерь от индукции за счет множителя $r(1 - B^2/B_s^2)$ в уравнении (1). Основная сложность применения уравнения (1) для описания процессов перемангничивания ТТ и, в частности, ТТНП, заключается в том, что в трансформаторах тока

функция $H_{\text{ct}}(B)$ в уравнении (1) сложным образом зависит от первичного тока.

Значительно упростить моделирование позволяет замена функции $H_{\text{ct}}(B)$ в (1) нелинейной зависимостью $H = f(B)$, например, ОКН или обобщенной СКН с учетом активных потерь в магнитном сердечнике, как и в моделях на основе ОКН или СКН постоянным сопротивлением, подключенным параллельно ветви намагничивания. Модель ТТНП в среде системы моделирования Matlab+Simulink, реализующая указанный подход, приведена на рис. 6.

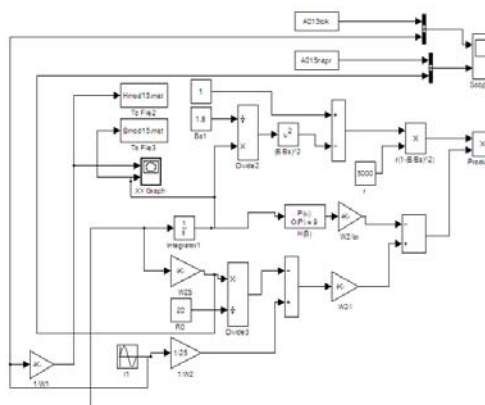


Рис. 6. Модель ТТНП на основе уравнения динамического перемангничивания (1) в среде системы Matlab+Simulink

Как показали исследования модели по рис. 6, предложенный способ представления функции $H_{\text{ct}}(B)$ в уравнении (1) дает практически точное совпадение петель гистерезиса реального ТТНП и его модели при значениях первичных токов до 5 А (рис. 7, а), что, в свою очередь, обеспечивает практически точное воспроизведение вторичного тока (рис. 8, а, б).

При увеличении первичного тока до значений, обуславливающих насыщение магнитопровода ТТНП, предложенный способ приводит к увеличению погрешностей воспроизведения статической петли гистерезиса $H_{\text{ct}}(B)$ и, соответственно, погрешностей преобразования мгновенных значений первичного тока (рис. 7, а и 8, в).

Таким образом, модель на основе уравнения динамики перемангничивания магнитного сердечника даже при упрощенном представлении функции $H_{\text{ct}}(B)$ обеспечивает значительно более высокую точность преобразования мгновенных значений первичного тока при работе ТТНП в режиме холостого хода (с большими вторичными нагрузками), чем модели на основе ОКН или СКН, в диапазоне первичных токов $I_1 < 10$ А. При больших значениях первичного тока I_1 погрешности рассматриваемой модели в режиме холостого хода ТТНП увеличиваются, однако остаются меньшими, чем погрешности моделей на основе ОКН и СКН.

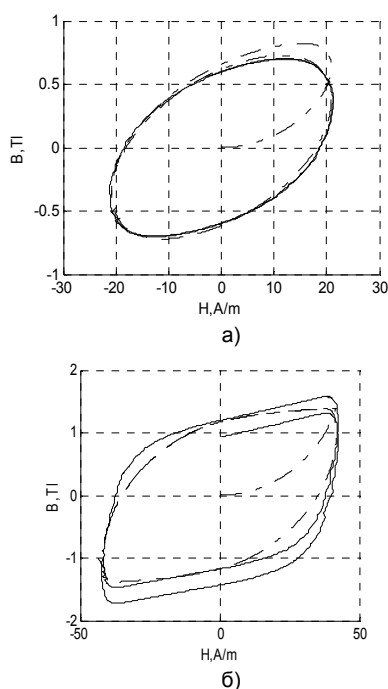


Рис. 7. Экспериментальные (сплошная кривая) и расчетные (пунктирная кривая) петли гистерезиса, полученные для моделей ТТП на основе уравнения динамики перемагничивания: а – $I_{ТТПН} = 5$ А; б – $I_{ТТПН} = 10$ А

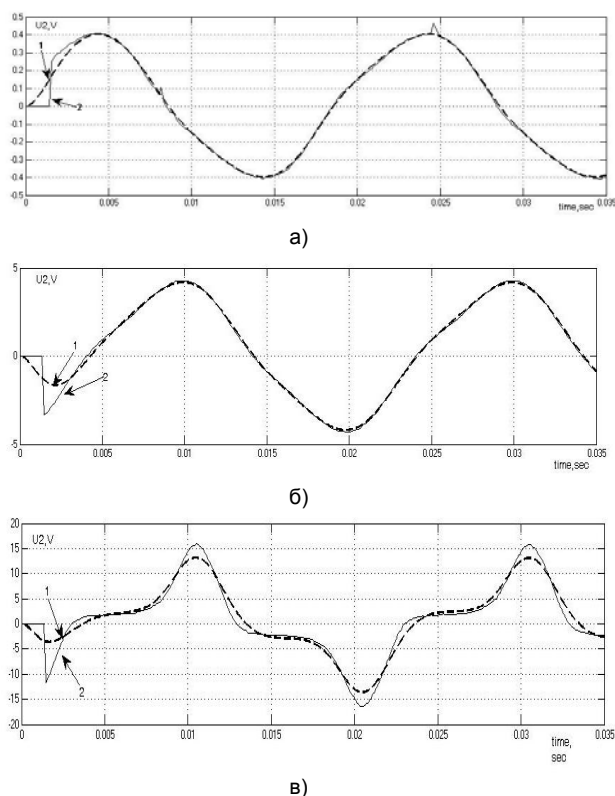


Рис. 8. Сравнение экспериментальных (кривая 2 и расчетных (кривая 1) осциллограмм $U_{2ТТПН}(t)$ для модели на основе уравнения (1) при работе ТТПН в режиме холостого хода: а – $I_{ТТПН} = 1$ А; б – $I_{ТТПН} = 5$ А; в – $I_{ТТПН} = 10$ А

В режиме малых нагрузок $Z_b < 1$ Ом погрешности модели на основе уравнения динамики перемагничивания магнитного сердечни-

ка также меньше, чем погрешности моделей на основе ОКН или СКН.

Исследование точности модели на основе уравнения динамики перемагничивания в переходных режимах работы ТТПН. Токи переходного процесса при ОЗЗ в сетях 6–10 кВ содержат две основные частотные составляющие, одна из которых связана с процессами разряда емкостей поврежденной фазы (разрядная составляющая), а другая – с процессами дополнительного заряда емкостей неповрежденных фаз (зарядная составляющая) [2]. При малых потерях в контуре нулевой последовательности обе составляющие имеют характер затухающих колебаний. Практически в устройствах защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, используется диапазон частот до 3–5 кГц [2]. Амплитуды переходных токов в сетях 6–10 кВ могут иметь значения от десятков до сотен и даже тысяч ампер. Поэтому представляет интерес оценка точности разработанных моделей ТТПН при первичных токах, имеющих характер затухающих колебаний.

Для испытаний реального образца ТТПН (типа ТЗЛМ) в переходных режимах использовалось устройство РЕТОМ-51 и COMTRADE-осциллограммы затухающих колебаний в диапазоне частот от 200 до 500 Гц. Для получения переходных токов с большей частотой (до 5 кГц и выше) использовалось физическое моделирование колебательного разряда емкости. Испытания реального образца и моделей ТТПН проводились для режима малых вторичных нагрузок ($Z_b = 0,1–1$ Ом). Полученные осциллограммы вторичных токов реального образца ТТПН сравнивались с расчетными осциллограммами, полученными для моделей ТТПН на основе ОКН, СКН и уравнения динамики перемагничивания магнитопроводов.

Анализ результатов экспериментальных испытаний и результатов моделирования показал, что при малых вторичных нагрузках ТТПН в диапазоне частот до 5–10 кГц и амплитуде до ~400 А приемлемую (с погрешностями до 10 %) точность преобразования мгновенных значений первичного переходного тока обеспечивают как модель на основе уравнения динамики перемагничивания (1), так и модели на основе ОКН и СКН. Более высокую точность обеспечивает первая из указанных моделей (например, рис. 9).

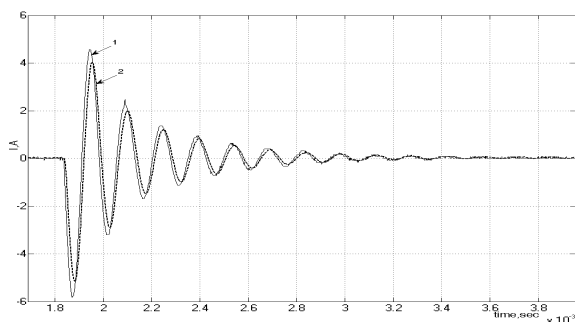


Рис. 9. Осциллограммы вторичных токов реального ТТП (экспериментальная кривая 1) и модели (расчетная кривая 2) при частоте колебаний переходного тока $f_{пер} = 7$ кГц и вторичной нагрузке $Z_b = 1$ Ом

Уменьшение вторичной нагрузки ТТП приводит к повышению точности преобразования мгновенных значений первичного тока (рис. 10).

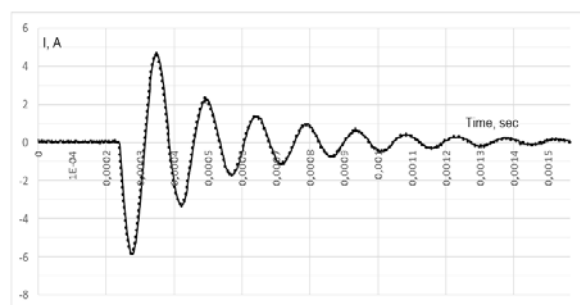


Рис. 10. Осциллограммы вторичных токов реального ТТП (экспериментальная кривая 1) и модели (расчетная кривая 2) при частоте колебаний переходного тока $f_{пер} = 7$ кГц и вторичной нагрузке $Z_b = 0,1$ Ом

Таким образом, предложенная модель ТТП на основе уравнения динамики перемагничивания магнитного сердечника (1) позволяет обеспечить приемлемую точность при исследованиях не только статических, но и динамических режимов функционирования устройств защиты от ОЗЗ, имеющих малое входное сопротивление по цепям тока $Z_b < 1$ Ом.

Заключение

На основе экспериментальных исследований и моделирования на ЭВМ показано, что модель ТТП (типа ТЗЛМ) на основе ОКН при работе последнего в режиме, близком к холостому ходу (с большой вторичной нагрузкой), дает приемлемые погрешности (до ~10 %) для среднеквадратичных значений вторичного напряжения только на линейном участке кривой намагничивания. Погрешности модели на основе ОКН по мгновенным значениям вторичного напряжения могут значительно превышать 10 %, что обуславливает возможность значительных искажений спектра высших гармоник вторичного напряжения.

Модель на основе СКН обеспечивает значительное уменьшение погрешности по мгновенным значениям вторичного напряжения в ре-

жиме холостого хода ТТП до ~10 % в диапазоне первичных токов ТТП с частотой 50 Гц от 1 до 10 А. При значениях первичного тока за пределами указанного диапазона модель на основе СКН не позволяет обеспечить приемлемую величину погрешности для режима холостого хода ТТП.

При работе ТТП с малыми вторичными нагрузками, характерными для микроэлектронных и микропроцессорных устройств защиты от ОЗЗ ($Z_b \leq 1$ Ом), модели на основе ОКН и СКН позволяют обеспечить приемлемые погрешности преобразования мгновенных значений первичного тока с частотой 50 Гц в диапазоне первичных токов до 100 А и более.

При увеличении частоты первичного тока погрешности моделей на основе ОКН и СКН для ТТП, работающего с малыми вторичными нагрузками, уменьшаются по сравнению с погрешностями при частоте 50 Гц.

Более перспективным для построения моделей ТТП представляется подход, основанный на использовании уравнения динамики перемагничивания магнитопровода трансформатора тока. Модели на основе данного подхода позволяют обеспечить наименьшие погрешности по мгновенным значениям вторичных величин как в стационарных, так и в переходных режимах работы ТТП.

Список литературы

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
2. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001. – 104 с.
3. Cundeva S. A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis // Serbian Journal of Electrical Engineering. – 2008. – Vol. 5, no. 1. – P. 21–30.
4. Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of Ferromagnetic Hysteresis // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1986. – Vol. 61. – P. 48–60.
5. Jiles D.C., Thoele J.B., Devine M.K. Numerical Determination of Hysteresis Parameters for Modeling of Magnetic Properties using The Theory of Ferromagnetic Hysteresis // IEEE Transactions on Magnetics. – 1992. – Vol. 28, no. 1. – P. 27–34.
6. Володин В.Я. Моделирование сложных электромагнитных компонентов при помощи Spice-симулятора LTspice/SwCAD III // Компоненты и технологии. – 2008. – № 4. – С. 175–182.
7. Chan J.H., Vladimirescu A. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation // IEEE Transactions on Computer-Aided Design. – 1991. – Vol. 10, no. 4. – P. 476–482.
8. Афанасьев В.В. Трансформаторы тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 416 с.
9. Казанский В.Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. – М.: Энергия, 1969. – 183 с.
10. Подгорный Э.В., Хлебников С.Д. О выборе расчетной характеристики трансформаторов тока в переходных режимах // Электричество. – 1966. – № 9. – С. 87–90.
11. Кадочников А.И. Динамические петли магнитного гистерезиса. – Екатеринбург, 2007. – 268 с.

References

1. Likhachev, F.A. Zamykaniya na zemlyu. Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov [Ground faults. Ground faults in networks

with isolated neutral and compensated capacitive currents]. Moscow, Energiya, 1971. 152 p.

2. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Ground fault protection in medium-voltage networks]. Moscow, NTF «Energo-progress», «Energetik», 2001. 104 p.

3. Cundeva, S. A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. Serbian Journal of Electrical Engineering, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 21–30.

4. Jiles, D.C., Atherton, D.L. Theory of Ferromagnetic Hysteresis. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986, vol. 61, pp. 48–60.

5. Jiles, D.C., Thoeke, J.B., Devine, M.K. Numerical Determination of Hysteresis Parameters for Modeling of Magnetic Properties using The Theory of Ferromagnetic Hysteresis. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, vol. 28, no. 1, pp. 27–34.

6. Volodin, V.Ya. Modelirovaniye slozhnykh elektromagnitnykh komponentov pri pomoshchi Spice-simulyatora LTspice/SwCAD III [Modeling of complex electromagnetic

component of the Spice simulator LTspice/SwCAD III]. *Komponenty i tekhnologii*, 2008, no. 4, pp. 175–182.

7. Chan, J.H., Vladimirescu, A. Nonlinear Transformer Model for Circuit Simulation. IEEE Transactions on Computer-Aided Design, 1991, vol. 10, no. 4, pp. 476–482.

8. Afanas'ev, V.V. *Transformatory toka* [Current transformers]. Leningrad, Energoatomizdat, 1989. 416 p.

9. Kazanskiy, V.E. *Transformatory toka v skhemakh reley-noy zashchity* [Current transformers in protection circuits]. Moscow, Energiya, 1969. 183 p.

10. Podgornyy, E.V., Khlebnikov, S.D. O vybore raschetnoy kharakteristiki transformatorov toka v perekhodnykh rezhimakh [On the choice of calculated characteristics of current transformers in transient modes]. *Elektrichestvo*, 1966, no. 9, pp. 87–90.

11. Kadochnikov, A.I. *Dinamicheskie petli magnitnogo gisteretizisa* [Dynamic magnetic hysteresis loops]. Ekaterinburg, 2007. 268 p.

Шуин Владимир Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru

Лебедев Владимир Дмитриевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, зав. кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Филатова Галина Андреевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-06,
e-mail: fgala90@mail.ru